



Numerisk modellering af radonindtrængning til enfamiliehuse

Andersen, C.E.

Published in:
Truslen mod indeklimaet fra jordforureninger

Publication date:
2001

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Andersen, C. E. (2001). Numerisk modellering af radonindtrængning til enfamiliehuse. In *Truslen mod indeklimaet fra jordforureninger* (pp. 45-54). ATV-fonden for Jord og Grundvand.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

NUMERISK MODELLERING AF
RADONINDTRÆNGNING TIL ENFAMILIEHUSE

Seniorforsker Claus E. Andersen
Afd. for Nuklear Sikkerhedsforskning
Forskningscenter Risø

ATV MØDE
Truslen mod indeklimaet fra jordforureninger

Schæffergården
3. maj 2001

1 Indledning

Den primære årsag til forhøjede koncentrationer af radon i danske enfamiliehuse er, at der trænger radon ind fra jorden umiddelbart under husene. For moræner er poreluftkoncentrationen af radon normalt 1000 til 10000 gange højere end udeluftens koncentration, og selv en meget lille indtrængning af jordluft til et hus kan derfor have stor betydning for dets radonkoncentration. En ny undersøgelse [1] baseret på helårsmåling af radonkoncentrationen i omkring 3000 danske enfamiliehuse viser, at der med stor sikkerhed forekommer radon fra jorden i 70% af alle danske enfamiliehuse. Indtrængning af jordluft til danske huse kan således anses for at være et relativt almindeligt fænomen.

Interessen omkring radon skyldes, at radon er radioaktiv, og at høje koncentrationer af radon i indeklimaet således udgør et strålingsmæssigt problem. For Danmark vurderes det, at radon forårsager 300 lungekræfttilfælde om året [2], og at 65000 danske enfamiliehuse har radonkoncentrationer over den grænse på 200 Bq/m^3 , hvor bygningsmyndighederne anbefaler, at der foretages enkle og billige tiltag til reduktion af radonkoncentrationen [1]. Tilsvarende forhold gælder i mange andre lande, og siden slutningen af halvfjerdserne er der derfor foretaget mange undersøgelser af problemet. Forskningscenter Risø har deltaget i dette arbejde, og, som det vil fremgå af det følgende, har vi bl.a. anvendt numeriske beregningsmodeller til at belyse de mekanismer, som styrer indtrængningen af radon.

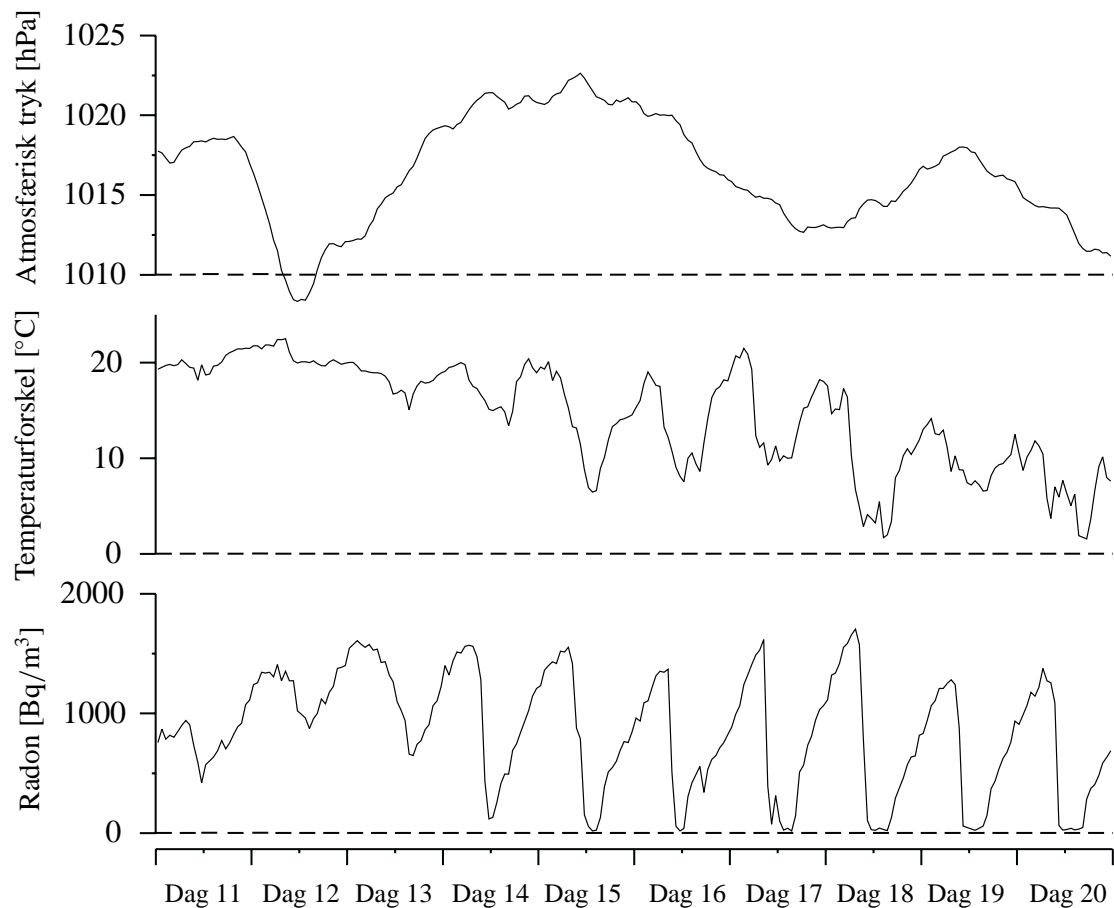
2 Mekanismer

Radon er en ædelgas, og transport i jord sker som en kombination af diffusion og advektion. Den advektive indtrængning til huse vurderes primært at forekomme pga. jordluftindtrængning drevet af vind- og temperaturinducerede indendørs-udendørs trykforskelle af størrelsesordenen 1–3 Pa. Figur 1 viser et eksempel på hvordan radonkoncentrationen i et hus har en døgnrytme, der følger svingerne i udelufttemperaturen og husets brug (udluftninger). Radonkoncentrationen ændres både som følge af ændringer i indtrængning og luftskifte. Figuren viser, at der også opnås høje radonkoncentrationer i den del af perioden, hvor atmosfæretrykket er stigende. For det konkrete hus formodes det derfor, at fald i det atmosfæriske tryk næppe giver anledning til nogen væsentlig radonindtrængning i sammenligning med de andre mekanismer.

Ved numerisk modellering af radontransport i jord anvendes en transportligning for radon med led for produktion pga. tilstedeværelsen af radium i jorden, radioaktivt henfald (halveringstiden for radon er 3.8 dage), deling af radon mellem luft og vand i porerne, samt diffusion og advektion. Desuden opstilles en separat transportligning for bulk bevægelse af jordluft. Normalt beskrives transporten ved Darcy flow. En mere detaljeret gennemgang af grundlaget findes andetsteds [3, 4].

De numeriske modeller løser transportligningerne for et nøjere defineret system beskrevet ved materialeparametre (bl.a. porøsitet, diffusivitet og permeabilitet), randværdier (bl.a. tryk og radonkoncentration ved jordoverfladen) og geometri (bl.a. revnebredde, husets størrelse og tykkelsen af den umættede zone). Resultatet af beregningerne er strømnings- og radonkoncentrationsfelter, samt indtrængningshastigheden af jordluft og radon.

Resultaterne i det følgende er beregnet med RnMod3d, som er en tredimensional tidsafhængig



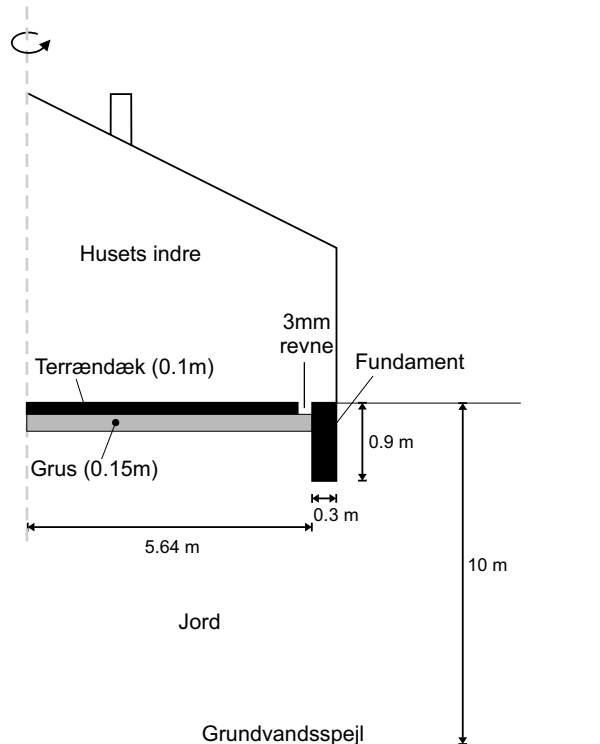
Figur 1: Kontinuerte målinger af atmosfæretryk, indendørs-udendørstemperaturforskel og radonkoncentration for hus nr. 4185 i den såkaldte Radon-95 undersøgelse [5]. Målingerne er fra den 11. til den 20. april, 1996.

finite-volume model udviklet på Risø [6]. Modellen er rent matematisk verificeret ved sammenligning med en række andre modeller [7] samt ved sammenligning med analytiske løsninger for nogle simple problemer.

3 Temperaturinducerede trykforskelle

Beregningerne er foretaget for et 100 m^2 referencehus med terrændæk. For at simplificere beregningerne er det antaget, at huset er cirkulært således, at problemet bliver todimensionalt. Desuden er det antaget, at alle forhold er stationære. Huset er skitseret i Figur 2, og Tabel 1 giver en oversigt over alle anvendte parametre.

Huset står på en blok af homogen jord med 10 m tykkelse og 20 m radius. Umiddelbart under betondækket har huset et kapillarbrydende lag med en høj gaspermeabilitet, og huset har en revne hele vejen rundt, hvor dæk og ydervæg støder op til hinanden. Revnebredden er sat til 3 mm. Der indgår ikke eksplicit andre revner i beregningerne, men de anvendte transportparametre for jord og betondæk kan siges at afspejle en vis revnedannelse. Beregningerne er oprindeligt foretaget til brug for den såkaldte UNSCEAR rapport [8] (en rapport fra FN med en oversigt over de strålingsmæssige forhold i verden), og diffusiviteten for betondækket er sat til en relativ høj værdi (svarende til en diffusionslængde på 22 cm) i overensstemmelse med tal fra



Figur 2: Geometriske dimensioner af huset, som anvendes i modelberegningerne.

Tabel 1: Modelparametre for beregningerne i Figur 3.

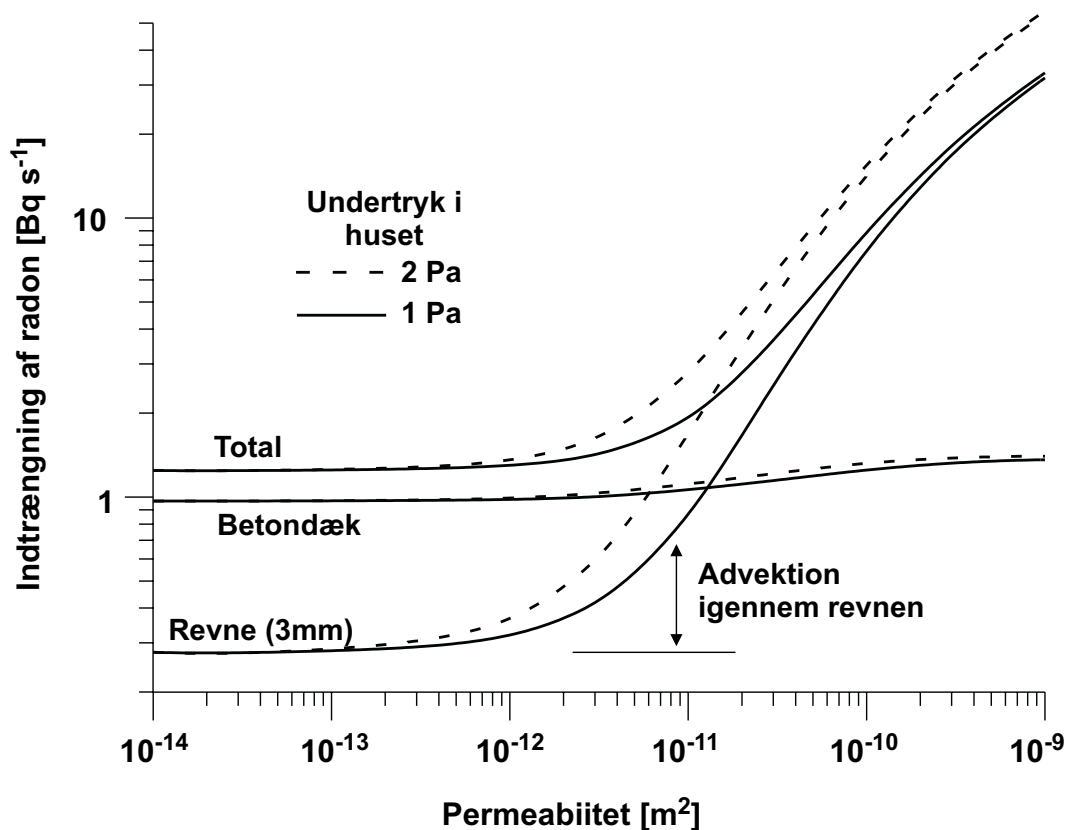
	Radium Bq kg^{-1}	Emanations- grad	Total- porøsitet	Vand- mætning	Diffusivitet $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Permeabilitet m^2
Betondæk	50	0.1	0.20	0	$2.0 \cdot 10^{-8}$	10^{-15}
Grus	40	0.2	0.40	0	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Jord	40	0.2	0.25	0.2	$4.3 \cdot 10^{-7}$	variabel
Fundament	0	0	0	0	10^{-10}	10^{-15}
Revne (3mm)	0	0	1.00	0	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$7.5 \cdot 10^{-7}$

Florida, USA [9]. Dansk beton har muligvis en noget lavere radondiffusivitet.

Figur 3 viser den beregnede indtrængning af radon til huset som funktion af jordens gaspermeabilitet, når huset har et undertryk på enten 1 eller 2 Pa. Man kan umiddelbart omsætte de beregnede indtrængningsrater til radonkoncentrationer i indeklimaet:

$$c = c_0 + \frac{J}{\lambda_v V} \quad (1)$$

hvor c_0 er udeluftens radonkoncentration på omkring 8 Bq/m^3 , J er modellens beregnede tilførsel af radon fra jord og betondæk, λ_v er husets luftskifte (f.eks. 0.3 gange per time), og V er husets volumen (250 m^3). For J lig 1 Bq/s bliver husets radonkoncentration 50 Bq/m^3 . Tilsvarende svarer J lig 10 Bq/s til en radonkoncentration på omkring 500 Bq/m^3 . For huse



Figur 3: Indtrængshastigheden af radon til modelhuset ved undertryk på 1 eller 2 Pa som funktion af jordens gaspermeabilitet.

med en gaspermeabilitet, som ikke er ekstrem høj (større end 10^{-10} m^2), svarer modelberegningerne altså i det store hele til huskoncentrationer i intervallet fra 50 til 500 Bq/m^3 . Det er værd at bemærke, at radonkoncentrationen for de 3000 huse i den landsdækkende undersøgelse [1] faktisk lå i intervallet fra 2 til 600 Bq/m^3 . Den gode overensstemmelse mellem modelberegningerne og målte radonkoncentrationer viser, at man ikke på dette grundlag umiddelbart kan afkræfte, at modellen og de bagvedliggende forudsætninger (herunder de valgte parametre) giver et retvisende billede af de faktiske forhold.

Figur 3 viser både den totale indtrængning samt indtrængningen opdelt efter om den foregår via betondæk eller revne. Indtrængning via betondækket er omkring 1 Bq/s næsten uafhængig af tryk og permeabilitetsforhold. En nøjere analyse viser, at hovedparten af denne indtrængning skyldes radon i jorden, som diffunderer igennem betonen. En vis del (dog max 0.23 Bq/s) skyldes "indtrængning" af radon, som dannes direkte i betondækket.

For høje permeabiliteter vil advektionen igennem revnen dominerer, og indtrængningen stiger her stort set proportionalt med tryk og permeabilitet. Beregningerne viser, at jordluft-indtrængningen er omkring $0.53 \text{ m}^3/\text{h}$ ved en permeabilitet på 10^{-10} m^2 og et undertryk på 1 Pa. Dette giver en radonindtrængning på 8.9 Bq/s . Det svarer til at den luft, som trænger ind som følge af undertrykket, har en koncentration på omkring 60000 Bq/m^3 . Dette er noget mindre end den maksimale radonkoncentration for poreluften på omkring 75000 Bq/m^3 , som forekommer de steder i jorden, hvor der ikke er transport (dvs. hverken diffusion eller advektion). Nedgangen i radonkoncentration skyldes primært, at radonfattig luft trænges ned i jorden til erstatning for den luft, som suges ind i huset. Der er således tale om en jordventilation.

Beregninger viser, at gaspermeabiliteten af jorden og det kapillarbrydende lag er af stor betydning for indtrængningens størrelse. Hvis der er et høj-permeabelt kapillarbrydende lag, spiller selve revnerne en mindre rolle, når disse antager en vis størrelse og mængde. For den betragtede konfiguration med en pæn glat revne hele vejen rund langs huset af mindre betydning for indtrængningen om revnebredden er 0.5, 3, eller 10 mm med mindre jorden er meget permeabel (større end 10^{-11} m^2). Først når revnen er mindre end en brøkdel af en millimeter, bliver luftmodstanden i revnen væsentlig i sammenligning med den modstand jorden normalt yder.

4 Ændringer i det atmosfæriske tryk

Som antydnet i indledningen kan et fald i det atmosfæriske tryk drive jordluft ind i huse, og formålet med det følgende er at belyse problemet nærmere. Beregningerne stammer fra det såkaldte lossepladsgasprojekt [10].

Efter et “fald i barometerstanden” er der ubalance mellem trykket i jordluften under huset og atmosfæren. Overtrykket i jorden må udlignes ved en strømning af luft. Jo større et gasreservoir, der i jorden, jo større luftmængde skal flyttes, førend der igen er balance. For et 100 m^2 jordareal med en 10 m umættet zone og en gasporøsitet på 0.2, vil en 1% ændring i atmosfæretrykket (f.eks. fra 1010 hPa til 1000 hPa) overslagsmæssigt kræve, at der strømmer

$$100 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} \cdot 0.2 \cdot 0.01 = 2 \text{ m}^3 \text{ luft} \quad (2)$$

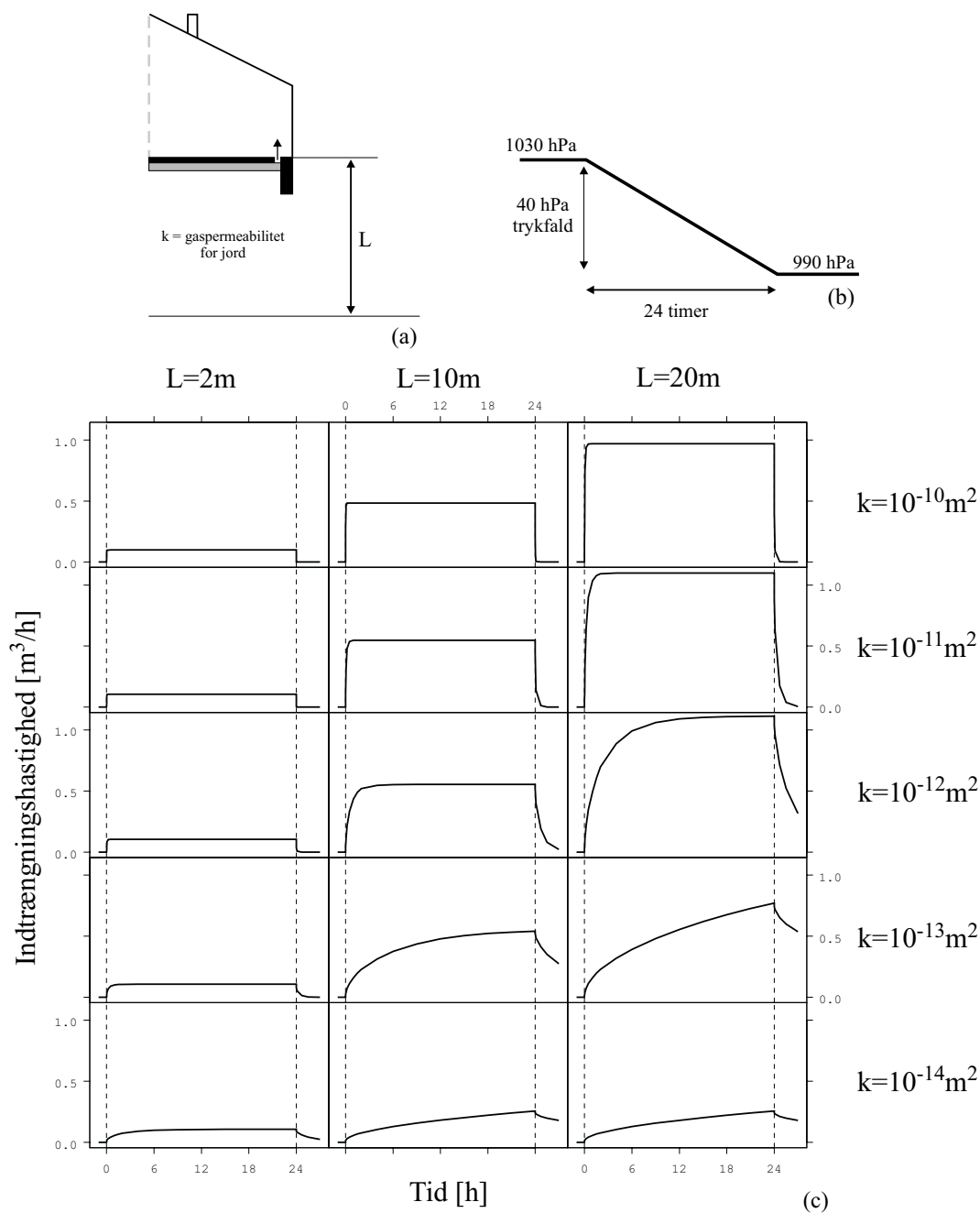
Imidlertid udbreder trykændringer sig ikke momentant i jord, så det er ikke givet, at strømningen er tilendebragt førend atmosfæretrykket igen har ændret sig. For homogene systemer foregår udbredelsen diffusivt med udbredelsestider, som afhænger af permeabilitet og porøsitet. Jordens responstid τ kan beregnes som:

$$\tau = \frac{L^2 \mu \epsilon}{k P_0} \quad (3)$$

hvor L er den vejlængde trykket skal udlignes over (f.eks. afstanden fra jordoverflade til grundvandsspejl), μ er den dynamiske viskositet ($18 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$), ϵ_a er jordens gasporøsitet, P_0 er middeltrykket (10^5 Pa), og k er jordens gaspermeabilitet. Med $L = 2 \text{ m}$ og $\epsilon_a = 0.3$ er τ omkring 6 timer for en permeabilitet på 10^{-14} m^2 og 2 sekunder for 10^{-10} m^2 .

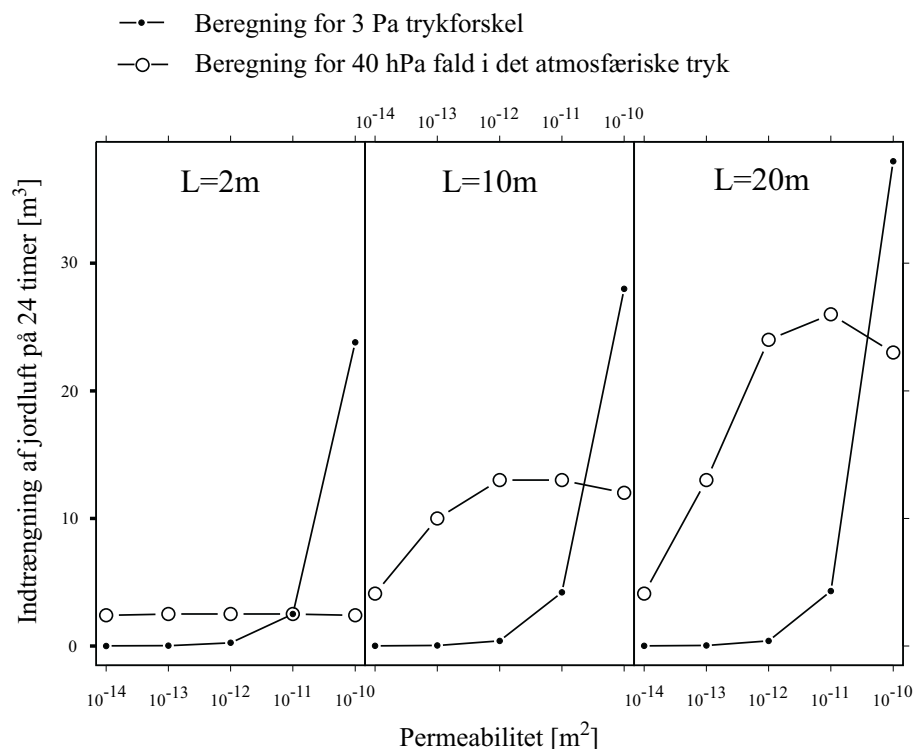
Der er foretaget modelberegninger af indtrængning af jordluft til modelhuset i Figur 2 (jorden antages dog at være uden fugt og med en porøsitet på 0.3) under et jævnt fald i det atmosfæriske tryk på 40 hPa. Trykfaldet forløber over en periode på 24 timer. Resultaterne for tre afstande til grundvandsspejlet og fem gaspermeabiliteter for jorden er vist i Figur 4. De viste beregninger omfatter alene jordluftindtrængningen. Det ses, at indtrængningshastigheden vokser op fra 0 til en maksimalværdi, som primært er karakteristisk for, hvor dybt grundvandsspejlet ligger: Jo dybere grundvandsspejl, jo større maksimalværdi. For 20 m umættet zone er maksimalværdien omkring $1 \text{ m}^3/\text{h}$. For 2 m er den omkring $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$. Gaspermeabiliteten har primært betydning for hvor hurtigt maksimalværdien opnås. Det ses af figuren, at hvis jordens gaspermeabilitet er under 10^{-13} m^2 , da opnås maksimalværdien ikke indenfor de 24 timer, som trykfaldet varer.

Figur 5 viser den samlede gasindtrængning over 24 timer som følge af det atmosfæriske trykfald på 40 hPa. Samtidig viser figuren hvilken gasindtrængning en konstant 3 Pa indendørs-



Figur 4: Modelberegning af indtrængningen af jordluft til modelhuset i Figur 2, når det atmosfæriske tryk falder 40 hPa over 24 timer. Beregningerne svarer til tre forskellige afstande til grundvandsspejlet og fem forskellige gaspermeabiliteter.

udendørs trykforskel forårsager. Figuren hjælper således til at sammenligne betydningen af de to drivkræfter. Det ses af figuren, at et fald i det atmosfæriske tryk af den givne størrelse giver anledning til en indtrængning af jordluft, som for permeabiliteter under 10^{-11} m^2 er væsentligt højere end den indtrængning en 3 Pa trykdifference kan afstedkomme. Advektionen på jorde



Figur 5: Modelberegning af hvor meget jordluft, som trænger ind i modelhuset over en periode på 24 timer som følge af enten: (1) et jævnt 40 hPa trykfald eller (2) et konstant undetryk på 3 Pa. Beregningerne er gennemført for forskellige afstande L til grundvandet og forskellige gaspermeabiliteter.

med lav permeabilitet må altså formodes at være styret af ændringer i det atmosfæriske tryk. For høje permeabiliteter (omkring $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ eller højere) er det imidlertid den “almindelige” indendørs-udendørs trykforskel, som er af størst betydning. Det skal her bemærkes, at trykfald på 40 hPa er en relativ sjældend begivenhed. En simpel analyse af trykmålinger på Risø for årene 1997–99 viser, at så store (sammenhængende) trykfald kun forekommer omkring 2 gange per år. Mindre trykfald på f.eks. 10 hPa (eller mere) forekommer dog ugentligt.

Selv om konkrete målinger, som dem i Figur 1, ikke tyder på, at ændringer i det atmosfæriske tryk er nogen vigtig drivkraft for jordluftindtrængning til danske huse, så kan vi ikke på grundlag af de her gennemførte modelberegninger afskrive deres betydning.

Litteratur

- [1] Andersen, C.E., Ulbak, K., Damkjær, A. og Gravesen, P.: Radon i danske boliger. Kortlægning af lands-, amts- og kommuneværdier. Rapport udgivet af Sundhedsstyrelsen, Statens Institut for Strålehygiejne, 132 sider, 2001. Rapporten kan downloades fra adressen: www.radon.dk.

- [2] Statens Institut for Strålehygiejne: Radon–boliger–strålingsdosis–lungekræftisiko. Sundhedsstyrelsen, 14 sider, 1987.
- [3] Nazaroff, W.W.: Radon transport from soil to air. *Review of Geophysics*, vol. 30(2), 137–160, 1992.
- [4] Andersen, C.E.: Numerical modelling of radon-222 entry into houses: An outline of techniques and results. *Science of the Total Environment*, vol. 272(1–3), 33–42, 2001.
- [5] Andersen, C.E., Bergsøe, N.C., Brendstrup, J., Damkjær, A., Gravesen, P. og Ulbak, K.: Radon-95: En undersøgelse af metoder til reduktion af radonkoncentrationen i danske enfamiliehuse. Risø rapport: Risø-R-979(DA), 108 sider, 1997. Rapporten kan downloades fra adressen: www.risoe.dk.
- [6] Andersen, C.E.: Radon transport modelling: User's guide to RnMod3d. Risø rapport: Risø-R-1201(EN), 116 sider, 2000. Rapporten kan downloades fra adressen: www.risoe.dk.
- [7] Andersen, C.E., Albarracín, D., Csige, I., van der Graaf, E.R., Jiránek, M., Rehs, B., Svoboda, Z., Toro, L. ERRICCA radon model intercomparison exercise. Risø rapport: Risø-R-1120(EN), 20 sider, 1999. Rapporten kan downloades fra adressen: www.risoe.dk.
- [8] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York, 2000.
- [9] Rogers, V.C., Nielson, K.K., Holt, R.B., og Snoddy, R: Radon diffusion coefficients for residential concretes. *Health Physics*, vol. 67(3), 261–265, 1994.
- [10] Retningslinier for undersøgelse og risikovurdering af gasproducerende lossepladser. Ukast til Miljøstyrelsen, december 2000.

Bibliografisk information:

Andersen, C.E., Numerisk modellering af radonindtrængning til enfamiliehuse. In: Truslen mod indeklimaet fra jordforureninger. ATV-møde, Gentofte (DK), 3 May 2001. (ATV-Fonden for Jord og Grundvand, Lyngby, 2001) p. 45-54